

# НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ НИКЕЛЯ, ДЕФОРМИРОВАННОГО В НАКОВАЛЬНЫХ БРИДЖМЕНА

*Красноперова Ю.Г.*

*Руководитель – с.н.с., д.т.н. Дегтярев М.В.*

ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, [highpress@imp.uran.ru](mailto:highpress@imp.uran.ru)

Образцы монокристаллического (111) никеля чистотой 99,98%, деформировали сдвигом под давлением 6 ГПа в наковальнях Бриджмена при  $T=300\text{K}$  с углами поворота 15, 180 градусов и 2, 5 и 10 оборотов. Поверхность образцов была параллельна плоскости {111}.

Расчет истинной логарифмической деформации проводили с учетом осадки, угла поворота наковальни ( $\varphi$ ) и расстояния от оси вращения. Экспериментальная погрешность определения степени деформации составляла  $\pm 0.2$  единицы логарифмической деформации.

После деформации образцы нагревали при  $100^\circ\text{C}$  в кипящей воде и  $150^\circ\text{C}$  в печи, с выдержкой 1, 10, 8, 32 и 64 часа. Твердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0.5 Н по радиусу образцов как после деформации, так и после отжига. Структуру исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии на расстоянии 1.5 мм от центра образца. Размеры элементов структуры определяли по результатам более 150 измерений, что обеспечивало погрешность менее 10%.

С увеличением степени деформации до  $e=3$  твердость никеля возрастает от 1.4 ГПа в исходном состоянии до 2.8 ГПа, затем интенсивность упрочнения уменьшается, а свыше  $e=5.3$  твердость не растет (рис.1).

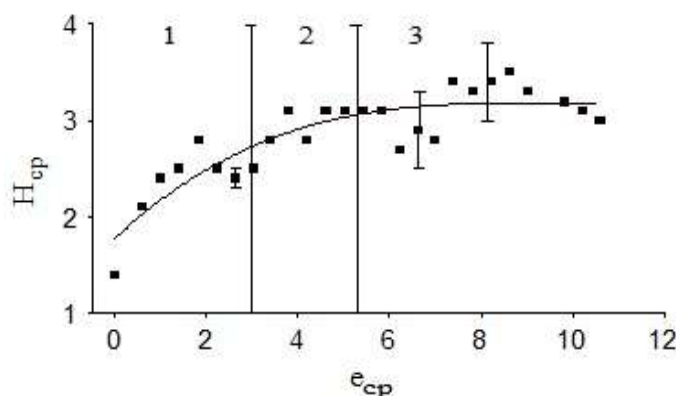


Рис.1 Стадийное изменение твердости монокристаллического никеля при деформации сдвигом под давлением

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям, каждому из этих выделенных интервалов соответствует определенный тип структуры: ячеистая (1), смешанного типа (2) и субмикроструктурная (СМК) (3).

Соответствующие типы структуры приведены на рисунке 2. Для исследования влияния типа структуры на рекристаллизацию были выбраны степени деформации, обеспечивающие образование структуры необходимого типа:  $e=1.4$  – ячеистая структура ( $\varphi=15^\circ$ ),  $e=4.8$  – структура смешанного типа ( $\varphi=180^\circ$ ),  $e>6$  – СМК-структура (после 2 оборотов наковальни  $e=6.7$ , 5 оборотов  $e=8.2$ , 10 оборотов  $e=9.2$ ). Приведенные степени деформации рассчитаны для радиуса 1.5мм, что соответствует области исследования структуры.

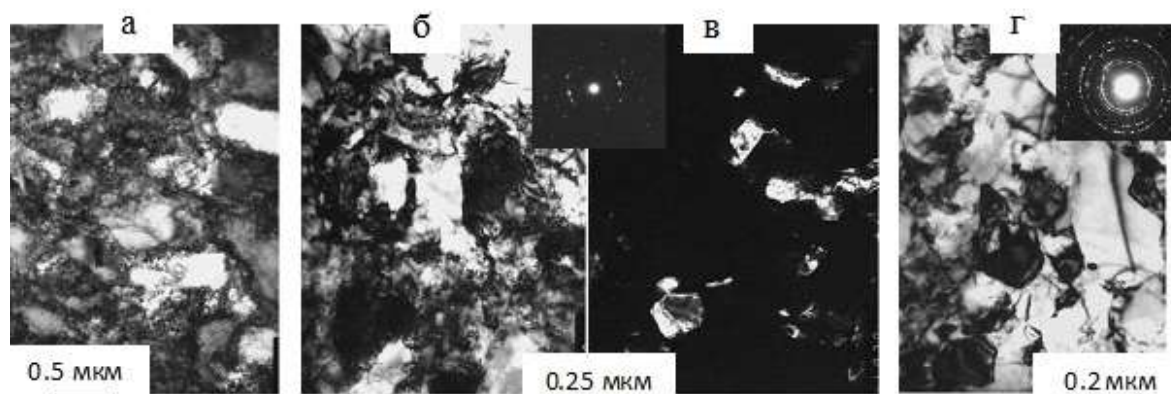


Рис.2 Микроструктура никеля на разных стадиях деформации а –  $e=1.4$ , б, в–  $e=4.8$ , г –  $e=6.7$ ; в – темное поле в рефлекс типа  $(111)_\gamma$

Отжиг при 100 и 150°C не изменяет твердость никеля со структурой ячеистого типа. В этой структуре при данной температуре рекристаллизация не развивается, т.к. не происходит термоактивированного зарождения (в никеле, деформированном прокаткой, рекристаллизация начинается при 250-300°C). Снижение твердости никеля со структурой смешанного типа и СМК незначительно при 100°C, а при 150°C составляет около 1 ГПа.

После отжига при 150°C, 64 ч в смешанной и СМК-структуре наблюдается опережающий рост отдельных центров рекристаллизации, доля рекристаллизации не превышает 10% (рис.3). Наибольшая скорость роста наблюдается в структуре смешанного типа, а увеличение степени деформации на стадии СМК-структуры не оказывает существенного влияния на рекристаллизацию, что может свидетельствовать о выходе деформации на установившуюся стадию. В никеле с СМК-структурой, в отличие от железа, при низкотемпературной рекристаллизации не выполняется кинетика нормального роста зерна (рис.4).

Деформация никеля на стадии СМК-структуры сопровождается сильным динамическим возвратом, обеспечивающим неизменность структуры никеля. В условиях динамического возврата СМК-структура неоднородна: те зерна, в которых возврат пошел в большей степени, получают преимущество в росте при последующем нагреве, поскольку представляют собой идеальные зародыши рекристаллизации. Зародыши,

возникшие в результате коалесценции соседних субзерен, могут приобрести размерное преимущество. При низкотемпературной рекристаллизации, когда не хватает термодинамической силы роста, такие центры, еще не столкнувшись, уже имеют размеры значительно большие, чем окружающие их микрокристаллиты.

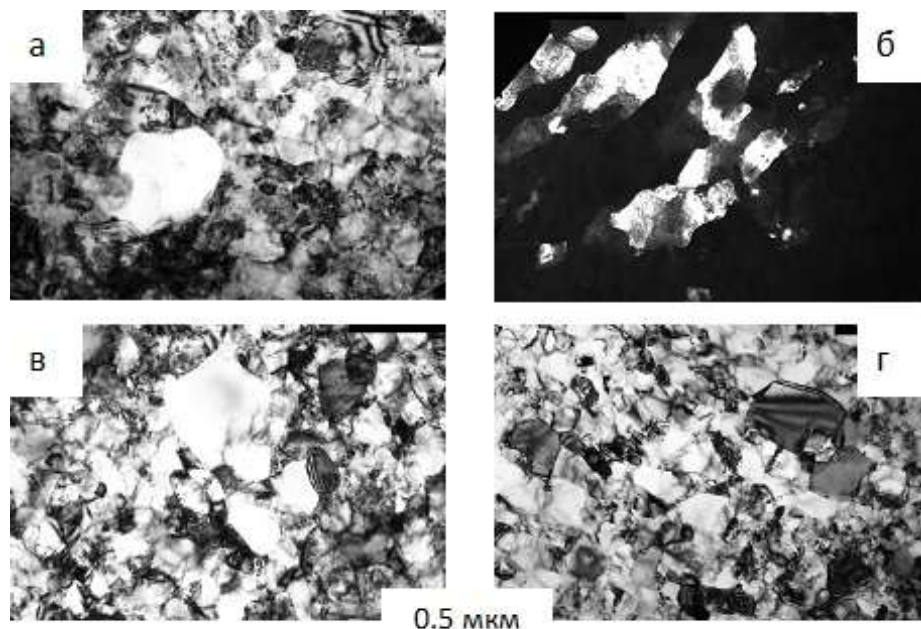


Рис.3 Микроструктура никеля после деформации и отжига при 150°C, 64ч  
а, б –  $\epsilon=4.8$ ; в –  $\epsilon=6.7$ ; г –  $\epsilon=9.2$

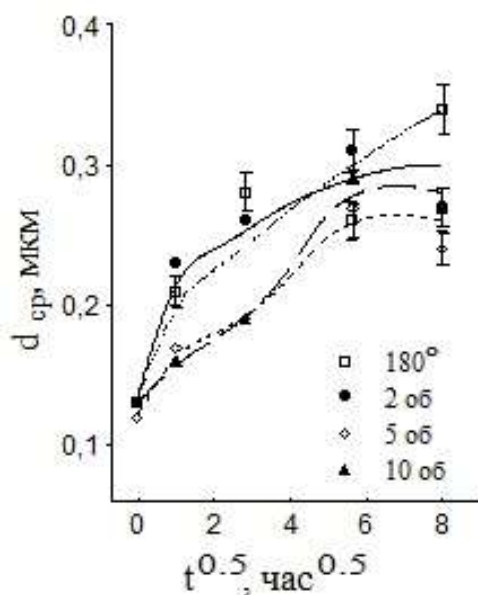


Рис.4 Кинетика  
низкотемпературной  
рекристаллизации никеля со  
структурой различного типа  
в ходе отжига при 150°C

В результате при низкотемпературной рекристаллизации однородная субмикрозернистая структура в никеле не формируется.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 11-03-00401 и программы Президиума РАН № 09-П-2-1025.